



条件制御下における食塩水滴中の結晶析出挙動の観察教材：

コンピュータとデジタルビデオカメラ装置実体顕微鏡を活用した実験教材プロトタイプの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2009-03-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田口, 哲, 樋田, 拓至 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00005774

条件制御下における食塩水滴中の結晶析出挙動の観察教材

— コンピュータとデジタルビデオカメラ装着実体顕微鏡を活用した
実験教材プロトタイプの開発 —

田口 哲・樋田 拓至

北海道教育大学札幌校化学教室

Observation System of Sodium Chloride Crystallization from Its Aqueous Solution Droplet under Controlling Experimental Conditions for Chemical Education

— Development of the System Prototype Constructed with a Computer and
the Microscope Mounted to a Digital Video Camera —

TAGUCHI Satoshi and TOIDA Takuzi

Laboratory of Chemistry, Sapporo Campus, Hokkaido University of Education

概 要

『スライドガラス上の食塩水滴からの水の蒸発に伴う食塩結晶析出過程の観察』を条件制御下で行うことができる簡易で安価な実験教材プロトタイプを開発した。デジタルビデオカメラを装着した実体顕微鏡を含む閉鎖系を用いて、温度・食塩水滴の初期濃度と体積は一定のもと、析出結晶数の時間変化に対して湿度と食塩水滴中心部の初期厚みとが与える影響を調べた。湿度と食塩水滴中心部の初期厚みの上昇は、同時間で比較すると、析出結晶数の低下を引き起こした。この結果は、食塩水滴の過飽和度の変化の観点から説明可能であった。『目には直接的には見えない溶質の関わる現象を理解するための教材』としての本教材の有効性と課題について考察した。

1 はじめに

学校教育で化学を学ぶ目的を一言で言えば、『物質観を育む』と言えよう。小・中・高等学校理科の化学的内容を鳥瞰すると、(1)巨視的から微視的な視点での理解へ、(2)定性的から定量的な理解

へ、(3)経験重視から科学的思考重視へ、と発達段階に応じた展開で物質観が育まれている事がわかる。この際、初等教育で扱われた主題が中等教育で再び扱われる『スパイラルアップ型カリキュラム』での知識体系構築¹⁾により物質理解の深化が目指されている。

このスパイラル中で扱われている現象の一つが、食塩やミョウバンの水への溶解と再結晶である。小学校5年『物の溶け方の規則性』の単元では、溶解の前後で『溶質+溶媒』の質量は変化せず、『溶けて見えなくなっても、その物質は消滅してはいない』ことを学ぶ¹⁾。中学校では、この『物質不滅の法則』を基に、溶解度や飽和といった物質の溶解に関する定量的概念を学んだ後、化合物分解の学習を経由して、物質の構成単位としての原子(粒子)概念が導入される。高等学校では、食塩(NaCl)の結晶構造やイオン結合を学んだ後、微視的視点から食塩の水への溶解メカニズムを学習する。しかし、このように発達段階に応じた系統的な学習がデザインされているにも関わらず、最近の調査では、食塩の水への溶解において質量保存則が成立しないと考える中学2年生が五割近くいることが報告されている²⁾。

ここで注目すべき点は、初等・中等教育での物質の溶解・再結晶の学習では、結晶析出・成長過程はほとんど扱われていない点である。しかし、この過程の学習は、物質科学に対する興味・関心の喚起³⁾だけでなく、溶液中の溶質の存在認識の強化や溶質の挙動に対する理解も深めるであろう。近年、デジタル(ビデオ)カメラが家庭や学校現場に普及し、撮影したデジタル映像をコンピュータに取り込んで編集したり、画像の濃淡情報を解析したりする事が容易に行えるようになってきており^{4,5)}、以前と比べて、結晶析出・成長過程の観察結果の解析を比較的容易に行える環境が整った。そこで我々の研究室では、顕微鏡・デジタルビデオカメラ・コンピュータを活用して、スライドガラス上の食塩水滴から水が蒸発する際の結晶析出挙動を観察し結晶成長速度を測定する方法を2003年に報告した⁶⁾。

その報告中では、食塩の結晶成長速度に食塩水滴の厚みと温度が与える影響等を検討したが、結晶析出・成長過程に影響する因子を意図的には制御しておらず、実験を数多く行うことで、注目する変数以外の変数が比較的近い値を示す比較可能なデータを選び出し解析を行っていた。このよう

な方法は、結果の解析の点から非効率だけでなく、教材を通して科学的思考を行うために必要な要件を満たしているとは言い難い。なぜならば、現象に影響を与えると考えられる多くの因子のうち、注目する因子以外の因子を一定値に制御し、注目する因子の値(独立変数)のみを意図的に変えることでその従属変数の応答を測定するという経験は、科学的思考を育成する上で欠くことが出来ないと考えるからである。すなわち、科学にとって実証性は不可欠な要件であり、実証の具体的手続きには因果関係(原因と結果の間の関係)の説明が必須なのである¹⁾。であるにも関わらず、条件制御下で結晶析出・成長過程を観察・測定する実験教材開発の報告例は我々の知る限り無い。

そこで本研究では、上記スパイラルの上位での活用を視野に入れ、スライドガラス上の食塩水滴からの水の蒸発に伴う食塩結晶析出過程の観察を条件制御下で行うことができる簡易で安価な実験教材プロトタイプを開発した。デジタルビデオカメラを装着した実体顕微鏡を含む閉鎖系を用いて、温度・食塩水の初期濃度と体積は一定のもと、析出結晶数の時間変化に対して湿度と食塩水滴中心部の初期厚みとが与える影響を各々調べた。その結果を過飽和度の点から考察することで、『目には直接的には見えない溶質の関わる現象』を理解するための教材としての本システムの有効性と課題について考察した。

2 条件制御を意図した結晶析出過程観察システムの構築と実験方法

2-1 簡易で安価なシステムの構築

スライドガラス上での食塩水滴からの水の蒸発に伴う結晶析出挙動に影響を与える制御因子としては、温度・湿度・スライドガラスの表面状態・食塩水滴中心部の初期厚み・食塩水滴の初期濃度と体積が考えられる。これらの因子を可能な限り制御しながら結晶析出過程を観察できる比較的簡易で安価なシステムを考案した(写真1)。

このシステムでは、実験器具を収めるための金

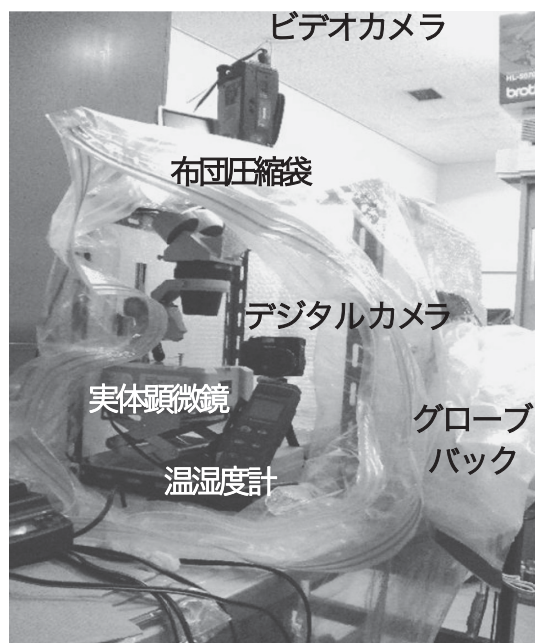


写真1 条件制御を意図した簡易で安価な結晶析出過程観察システムのプロトタイプ。

属フレーム（45 cm × 45 cm × 45 cm）で製作した枠組みを、ジッパー付きビニル製透明布団圧縮袋で覆うことで閉鎖系の構築を試みた。このビニル製布団圧縮袋の側面に、ホットシーラーで市販のグローブバック（写真2）を取り付けた。システム内部を加湿または除湿後このジッパーを閉めることで、システムを外部に開放することなくグローブを使って実験操作を行えるようにした。



写真2 システムにホットシーラーで取り付けられたグローブバック。

システム内部には、実体顕微鏡（Vixen SL-ZT、接眼レンズ10倍、対物レンズ（ズーム式）0.8倍、ラボジャッキ上）・デジタルカメラ（OLYMPUS

C4040）・デジタル温湿度計（CUSTOM CTH - 1100）・サーミスタに接続したリボンヒータ（スライダックで電圧調整）・試薬瓶入り6.13M～5.82M食塩水（飽和濃度～飽和濃度の95%濃度、和光純薬 特級 NaCl を溶質として、Millipore Elix-UV 3で製造した純水（15MΩcm）を溶媒として使用）・シリカゲルを入れたバット・スライドガラス・デジタルマイクロピペットを用意した。系の内部にはテーブルタップにより電源を確保した。実体顕微鏡の接眼レンズ上にはカメラ接続用アダプタを取り付け、システム外に出ず形でデジタルビデオカメラ（SONY DCR-TRV50）を取り付けた（写真1）。

2-2 湿度と温度の制御

湿度の制御は以下の通り行った。低湿度で実験する場合、システム内部にバットに入れたシリカゲル（写真3）を置き、システムのジッパーを閉

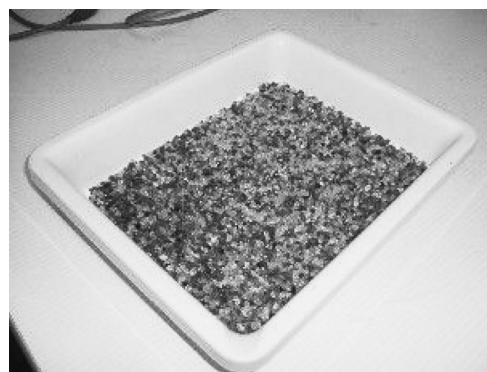


写真3 システム除湿用シリカゲル（プラスチックバットに入れて使用）。



写真4 家庭用気化式加湿器を使用したシステムへの加湿空気の送り込み。

め放置することで湿度を下げた。湿度の調整はシリカゲルの量によりおこなった。高湿度にする場合は、家庭用気化式加湿器の送風口にビニル製の筒を接続し、その加湿した空気をシステム内に送り込み（写真4）、所定の湿度に到達したらシステムをジッパーで密閉した。システム内の温度は、サーミスタに接続したリボンヒータ（スライダックで電圧調整）に通電することで $26\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ に制御した。なお、システム全体に気泡緩衝シートを貼り付けることで外気温が低い場合の温度低下を防いだ。

2-3 食塩水滴中心部の厚みの制御

スライドガラス上の食塩水滴中心部の初期 ($t = 0\text{ s}$) 厚みの制御は、食塩水滴を滴下する部分の外側に自動車ガラス用撥水性コーティング剤（疎水性）を塗布することで行った。手順は以下の通りである（図1）。まず、スライドガラスの幅に合わせてシリコンシートを正方形に切り出し、その中央をコルクボーラーで円形にくり抜き

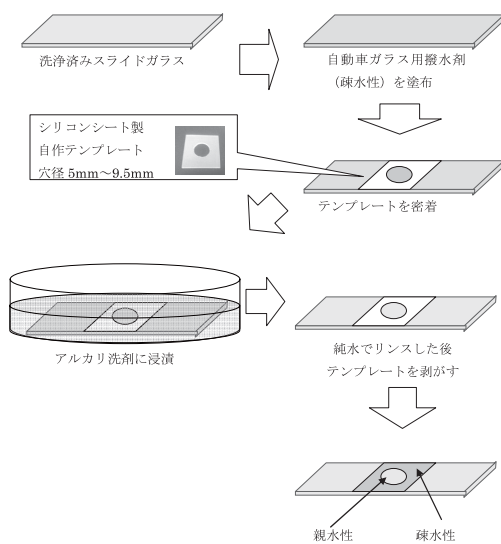


図1 食塩水滴中心部の初期厚みの制御用テンプレートの作成。

撥水性コーティング剤を塗布するためのテンプレートを作成した。次に、スライドガラス全体に撥水性コーティング剤を塗布し、その上からこのテンプレートを密着させた。これをアルカリ洗剤中にしばらく浸けて穴の部分のコーティング剤を除去した。その後、このスライドガラスを純水でリンスし、テンプレートをはがすと、穴のまわりのみコーティング剤が残った状態になった。穴の部分（親水部）に一定量の食塩水滴を静かにのせると穴の大きさに従って異なる厚みを持つ水滴ができた。穴の直径の違うシートを3種類 ($\phi = 5\text{ mm}, 8\text{ mm}, 9.5\text{ mm}$) 作成し、そのシートを用いて水滴の厚みの制御を試みた（図1）。

2-4 析出結晶数の時間変化の測定方法

測定は以下の通り行った。ジッパーで密閉後にシステムが目的の温度と湿度で安定したら、本体側面のグローブを使い、デジタルマイクロピペットで顕微鏡ステージ上のスライドガラス親水部に上記食塩水 $38\text{ }\mu\text{l}$ を静かにのせ、食塩水滴の真上からの動画撮影を顕微鏡に接続したビデオカメラで直ちに開始した。撮影は、水がほぼ全て蒸発するまで続けた。その動画を Apple iMac 上の動画編集ソフトウェア Apple Quick Time Pro を用いて1分毎の静止画として切り出し、結晶数の計測に使用した。また、実験開始時の食塩水滴中心部の初期厚みは、その側面をデジタルカメラで撮影し測定した（写真5）。

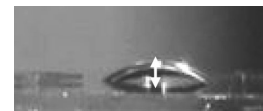


写真5 水滴側面の画像（矢印は中心部厚み）。

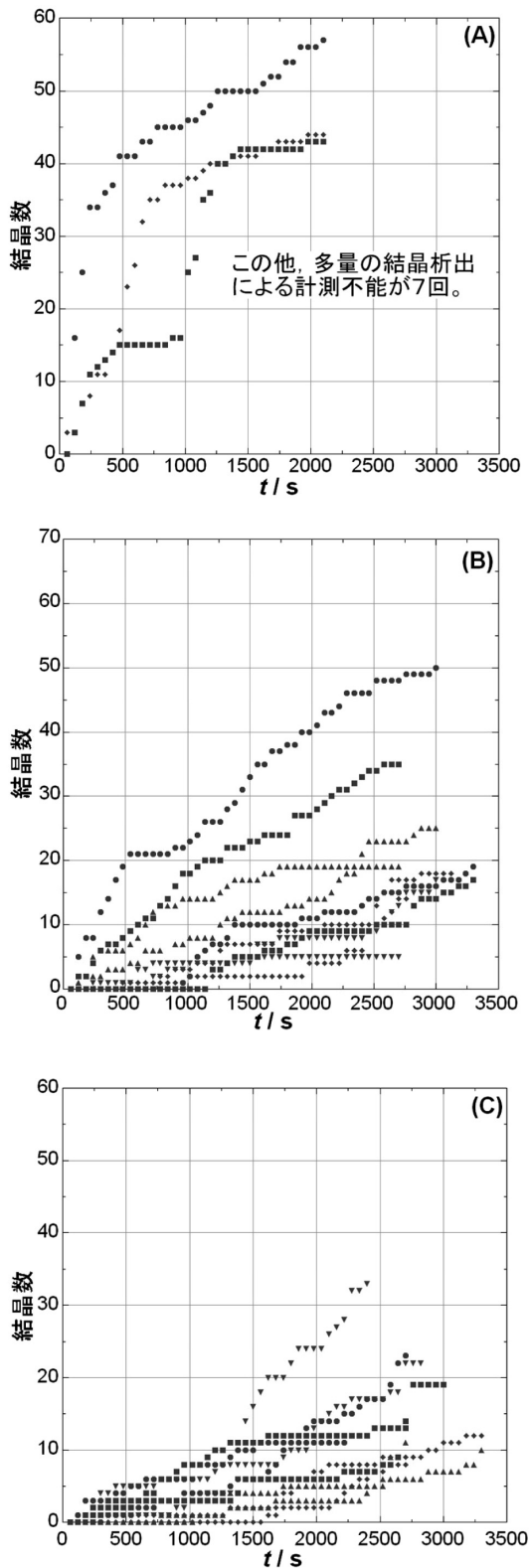


図2 食塩水滴 (38 μ l) の初期濃度 ((A) 6.13 M, (B) 5.94 M, (C) 5.82 M) が析出結晶数の時間変化に及ぼす影響。食塩水滴中心部の初期厚み 1.3 ± 0.1 mm, 温度 26.0 ± 0.3 $^{\circ}$ C, 湿度 60 ± 5 %。

3 結果

3-1 食塩水滴の初期濃度の影響

図2に、食塩水滴中心部の初期 ($t = 0$ s) 厚み 1.3 ± 0.1 mm, 温度 26.0 ± 0.3 $^{\circ}$ C, 湿度 60 ± 5 %の下、食塩水滴の初期 ($t = 0$ s) 濃度を6.13 M (飽和) (A), 5.94 M (飽和濃度の97%) (B), 5.82 M (飽和濃度の95%) (C) と下げた際の析出結晶数の時間変化を、食塩水滴から水がほぼ全て蒸発するまで、同条件で10回測定した結果を示す。結晶の析出は、食塩水滴から水が蒸発し過飽和状態に到達してから開始する。図2からわかるように、濃度が低いほど、結晶析出開始までに時間がかかり同時間では結晶数が少なくなる傾向にあった。初期濃度が高いと、析出する結晶数が増え顕微鏡下画像の結晶数の計測が困難になる一方、初期濃度が低いと、結晶析出開始までに時間がかかるようになった。以上より、以下に示す析出結晶数の時間変化の測定では、5.94 M食塩水滴を使用することにした。

3-2 析出結晶数時間変化に対する湿度の影響

図3に、食塩水滴中心部の初期厚み 1.3 ± 0.1 mm, 温度 26.0 ± 0.3 $^{\circ}$ Cの下、湿度を 30 ± 5 % (A), 60 ± 5 % (B), 90 ± 5 % (C) と上げた際の析出結晶数の時間変化を、食塩水滴から水がほぼ全て蒸発するまで、同条件で10~12回測定した結果を示す。挿入写真は、各湿度における $t = 2000$ sでの食塩水滴顕微鏡下画像の例である。

これらの結果から次の三点がわかる。一点目は、高湿度ほど、プロットの立ち上がりが長時間側にシフトし、同時間で比較すると析出結晶数が低下する傾向である。最終結晶数の平均値は、湿度30%で67個、60%で22個、90%で4個であった。二点目は、同条件で測定しても、プロットは必ずしも同じ軌跡を通らない点である。三点目は、湿度が高いほど、食塩水滴から全て水が蒸発するのに時間を要する傾向である。

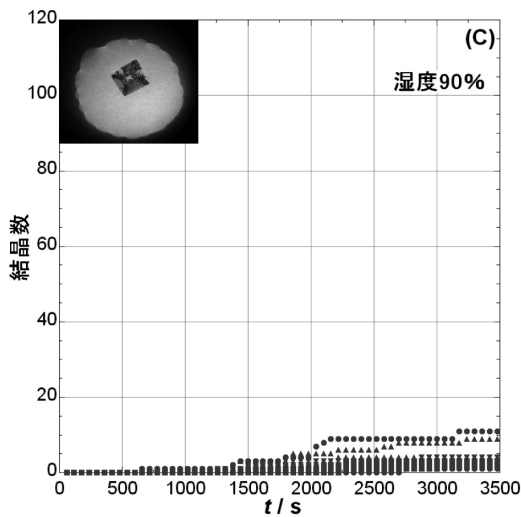
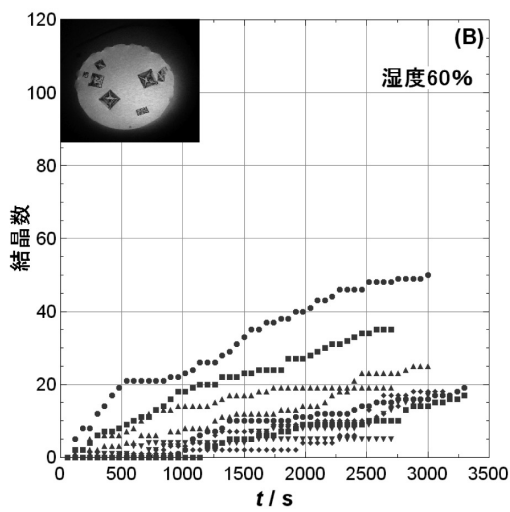
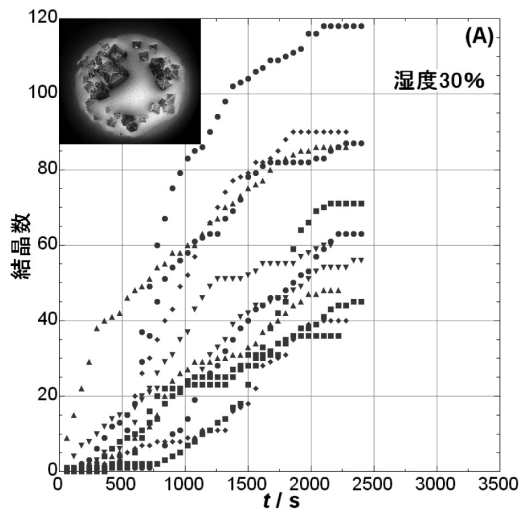


図3 5.94 M食塩水滴 (38 μ l) における析出結晶数の時間変化に湿度 ((A) $30 \pm 5\%$, (B) $60 \pm 5\%$, (C) $90 \pm 5\%$) が及ぼす影響。食塩水滴中心部の初期厚み 1.3 ± 0.1 mm, 温度 26.0 ± 0.3 $^{\circ}$ C。挿入写真は、各湿度での $t = 2000$ sの顕微鏡下画像の一例。

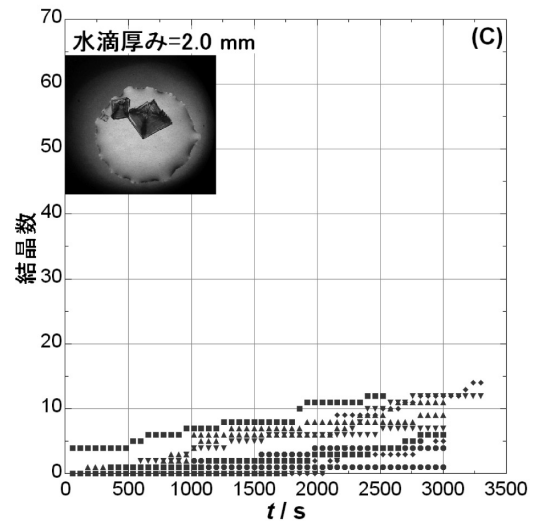
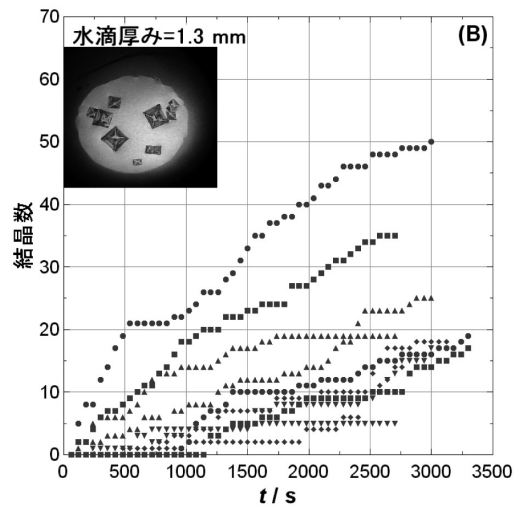
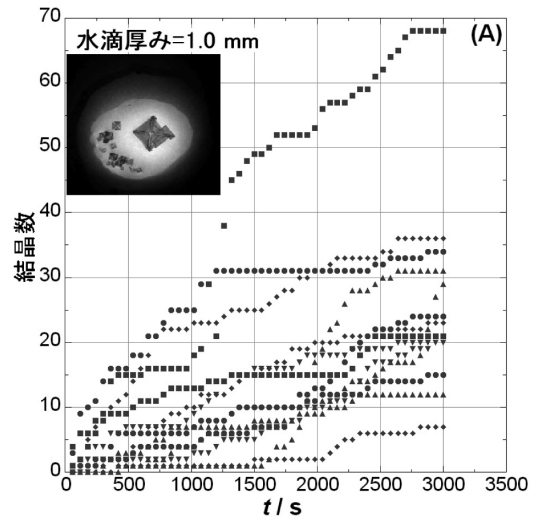


図4 5.94 M食塩水滴 (38 μ l) における析出結晶数の時間変化に食塩水滴中心部の初期厚み ((A) 1.0 ± 0.1 mm, (B) 1.3 ± 0.1 mm, (C) 2.0 ± 0.1 mm) が及ぼす影響。温度 26.0 ± 0.3 $^{\circ}$ C, 湿度 $65 \pm 5\%$ 。挿入写真は、各厚みでの $t = 2520$ sの顕微鏡下画像の一例。

3-3 析出結晶数時間変化に対する食塩水滴の厚みの影響

図4に、温度 26.0 ± 0.3 °C、湿度 60 ± 5 %の下、食塩水滴中心部の初期厚みを 1.0 ± 0.1 mm (A)、 1.3 ± 0.1 mm (B)、 2.0 ± 0.1 mm (C)と上げた際の結晶数時間変化を、食塩水滴から水がほぼ全て蒸発するまで、同条件で10~14回測定した結果を示す。挿入写真は、各水滴厚みにおける $t = 2520$ sでの食塩水滴顕微鏡下画像の例である。

これらの結果から、食塩水滴中心部の初期厚みが厚いほど、同時間で比較すると析出結晶数が低下する傾向がわかる。最終結晶数の平均値は、厚み 1.0 ± 0.1 mmで26個、 1.3 ± 0.1 mmで22個、 2.0 ± 0.1 mmで7個であった。

4 考 察

上記結果から、湿度と食塩水滴中心部の初期厚みの上昇は、析出結晶数の時間変化に対し同じ効果を示すことがわかる。以下では、食塩水滴中の過飽和度の観点から、湿度と食塩水滴の厚みとが析出結晶数の時間変化に与える影響を主に考察すると共に、本教材の有効性と課題についても考察する。

4-1 結晶核形成の駆動力と過飽和度

不安定相中での新しい安定相の生成、すなわち結晶核の形成が、不安定相と接触する固体表面や異物質の助けを借りない『均一核形成』で起こると仮定する。溶液から結晶核が生成するか否かは、結晶核前駆体（半径 r の球状を仮定）の成長に伴う前駆体のバルクギブス自由エネルギー変化 ΔG_B と前駆体の表面エネルギー変化 ΔG_S との和により決まる。すなわち、前駆体形成のギブス自由エネルギー変化 ΔG は、

$$\Delta G = \Delta G_B + \Delta G_S = -\frac{4\pi r^3}{3\nu} \Delta\mu + 4\pi r^2 \gamma \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ν は結晶を構成する要素粒子1個の体積、 $-\Delta\mu$ は粒子が液相から固相に取り込まれる際の粒子1個あたりのギブス自由

エネルギー変化（化学ポテンシャル変化）、 γ は表面張力である。 r がある値以上になると、 ΔG_B が ΔG_S よりも効く結果、 ΔG は減少に転じ結晶核が形成される⁷⁻⁹⁾。

前駆体が結晶核になる際の臨界核（半径 r^* ）形成のギブス自由エネルギー変化 ΔG^* は、 r に対する ΔG の極大値に相当する⁷⁻⁹⁾。この極大値では、(1)式を r で微分すると

$$\frac{d\Delta G}{dr} = -\frac{4\pi r^2}{\nu} \Delta\mu + 8\pi r \gamma = 0 \quad (2)$$

となり、この式を r について解くと、臨界核半径は $r^* = 2\nu\gamma/\Delta\mu$ と得られる。これを再び(1)式の r に代入することで、

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3\Delta\mu^2} \nu^2 \quad (3)$$

と求められる。また $\Delta\mu$ は、

$$\Delta\mu = kT \ln \frac{C}{C_e} = kT \ln(1 + \sigma), \quad \sigma = \frac{C - C_e}{C_e} \quad (4)$$

と表される⁷⁾。ここで、 k はボルツマン定数、 C は実際の溶液濃度、 C_e は溶液の飽和濃度を表す。(4)式より、溶液の過飽和度 σ が大きいほど $\Delta\mu$ も大きくなり、(3)式より、 $\Delta\mu$ が大きいほど ΔG^* は小さくなることがわかる。 ΔG^* が小さいほど結晶核形成は容易になると予想されるが、実際、核生成頻度は、 ΔG^* が小さいほど上昇することが理論的に示される⁷⁾。すなわち、 $\Delta\mu$ が結晶核形成の駆動力である。過飽和度 σ と結晶核形成の駆動力 $\Delta\mu$ の間には(4)式より正の相関があることから、以下では、 σ の観点から結晶析出過程について考察する。

4-2 食塩水滴円周部からの優先的な結晶析出

湿度・接触角によらず、結晶は、食塩水滴円周部で優先的に観察された(図3・4挿入写真)¹⁰⁾。同条件の単位表面積からの水の蒸発速度は表面上どこでも等しいと考えられる一方、食塩水滴の円周部は中心部に比べ厚みが薄いので(写真5)、水が蒸発すると円周部の σ は中心部の σ より高くなるであろう。結果、結晶核析出は前者で起こ

りやすい条件にあったと考えられる(図5)。言い換えれば、本教材では、スライドガラス上に食塩水滴を置いて顕微鏡で観察するだけという極めて単純な実験であるにも関わらず、一つの食塩水滴中に過飽和度 σ の異なる状態を作り出すことができたと言える。

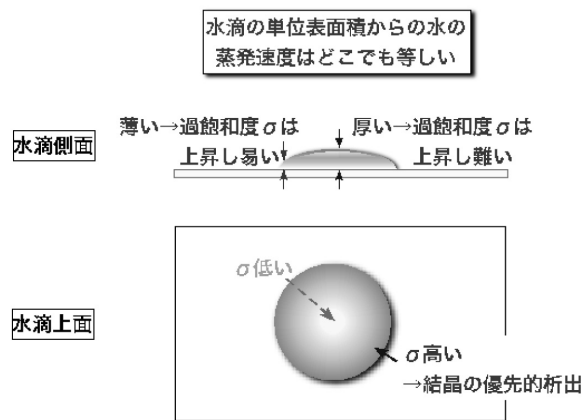


図5 食塩水滴円周部付近での優先的結晶析出。

4-3 析出結晶数時間変化に対して湿度と食塩水滴中心部の初期厚みを与える影響

食塩水滴中心部の初期厚みが同じ値の場合、高湿度ほど、プロットの立ち上がりは長時間側にずれる傾向が見られ、同時間の比較では析出結晶数は少なくなる傾向が見られた(図3)。これは、高湿度ほど、食塩水滴から水がゆっくりと蒸発するので水滴円周部の σ は上がり難く、その結果、結晶核形成の駆動力 $\Delta\mu$ が大きくなり難かった為と考えられる(図6)。

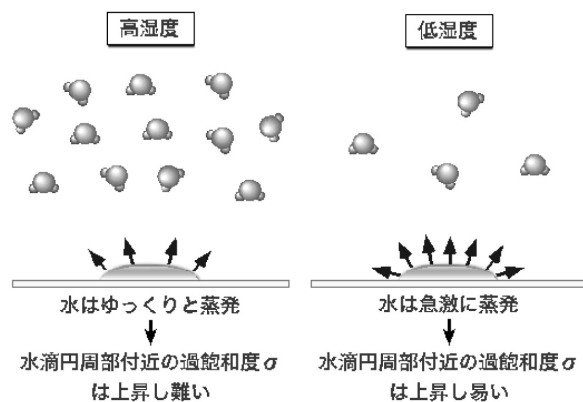


図6 湿度と食塩水滴円周部の過飽和度との関係。

一方、同湿度条件では、食塩水滴中心部の初期厚みが厚いほど、同時間で比較すると析出結晶数は少なくなる傾向が見られた(図4)。この厚みが厚いほど、結晶が析出する水滴円周部の厚みも厚くなる。したがって、この厚みが厚いほど水滴円周部の σ は上がり難いと考えられる。以上より図4の傾向は、食塩水滴中心部の初期厚みが厚いほど水滴円周部の σ が大きくなり難くなり、結果として $\Delta\mu$ も大きくなり難くなったことが原因と考えられる(図7)。

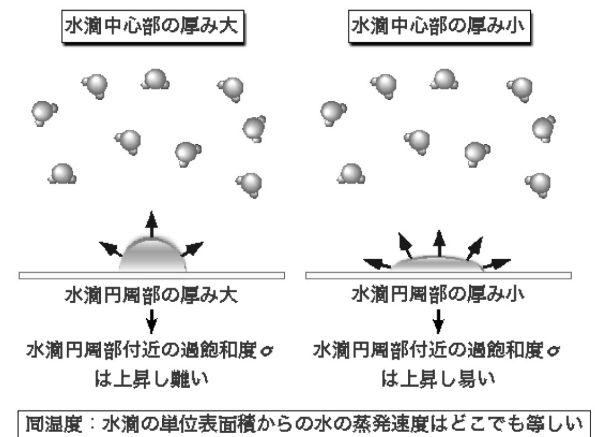


図7 食塩水滴中心部の厚みと水滴円周部付近の過飽和度との関係。

4-4 教材としての有効性と課題

以上、温度・食塩水滴初期濃度・食塩水滴初期体積・湿度または食塩水滴中心部の初期厚み、といった結晶析出過程に影響を与えると考えられる計四つの因子を可能な限り制御して、湿度と食塩水滴中心部の初期厚みが析出結晶数の時間変化に与える影響を各々調べた。その結果、湿度および食塩水滴中心部の初期厚みの上昇により、同時間で観測される結晶数の低下傾向が明らかになった。

初等・中等教育の理科における『物質の溶解・再結晶』を学ぶための実験教材では、本研究で示したような条件制御下での結晶析出過程の実験はほとんど扱われていない。本教材プロトタイプでは、条件制御下で実験を行うことで、以下に示すように『物質の溶解・再結晶』を“より深く”理

解できるようになると考える。

このシステムでは、複数の独立変数(ここでは、湿度と食塩水滴中心部の初期厚み)を変えてその従属変数(析出結晶数)の応答をみた。これら独立変数の変化は、いずれも『食塩水滴(円周部)の過飽和度 σ の変化』を引き起すと結論された。更にこの σ の変化は、結晶核形成の駆動力 $\Delta\mu$ の変化を引き起こし、その結果、上で述べた析出結晶数に関する傾向が観測されたと説明できる。この σ についての説明は、ある一つの食塩水滴中において、水滴円周部に局在化して結晶が析出する原因の説明(円周部は中心部よりも厚みが薄く σ が大きくなりやすい)とも整合していた。以上の考察の前提は、(結晶析出開始前において)『目では直接見えないとしても、この水滴中には食塩が存在している』との認識である。この観察教材を使用した食塩水滴中の結晶析出の顕微鏡下動画を見ることで、この認識は更に確かなものになるであろう。したがってこの教材は、溶液中の溶質の存在認識を強化し、且つ結晶析出過程をより深く理解するための教材になり得ると考える。

しかし、教材の実用化にあたっては以下四点の課題がある。一点目は、このシステムでは、系を完全に密閉することは困難であり、しばしば湿度の維持が困難であった点である(上の結果では、湿度が、目的の湿度 $\pm 5\%$ を維持した場合に限って示した)。二点目は、(特に低湿度において)析出する結晶が多く(最大120個)、結果の解析の効率性が低い点である。三点目は、上で述べた傾向性は確認できるものの、同条件でも、**図3**と**図4**のプロットは同じ軌跡を描かなかった点である。すなわち各プロットの再現性はあまり高くない点である。これは、上で考慮した制御因子を完全には制御しきれていないか、もしくは、未制御の関係因子がある為と思われる。例えば後者では、不均一核形成も起こり、スライドガラスの表面状態の違いが結果に影響している可能性もある。四点目は、スライドガラス上に食塩水滴をのせるためのマイクロピペット操作の際に使用したグローブ(ビニル製)の強度があまり高くなく、頻繁に

補修・交換が必要であった点である。

これらの課題を改善し、結晶成長速度に湿度と初期食塩水滴中心部の厚み(食塩水滴接触角)が与える影響も調べられるシステムについては別の論文¹¹⁾で報告する。さらに、実用化にあたっては、システムを小型化すると共に顕微鏡ではなく安価なルーペ等を使用した条件制御可能な実験教材を開発する必要があると考える。

5 結 論

私達に身近な食塩水を用いた、結晶析出過程の考察が可能な観察教材プロトタイプを提案した。スライドガラス上の食塩水滴中の析出結晶数に湿度と食塩水滴中心部の初期厚みとが与える影響を検討し、その影響は、食塩水滴円周部の過飽和度 σ の点から定性的ではあるが説明可能であった。実用化には解決しなければならない幾つかの課題が存在してはいるものの、このプロトタイプは、測定・考察過程を通して目には見えない物質(溶質)に対する理解や認識を深めることができる実験教材に発展し得ると考える。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号18500647)の助成を受けたものである。

注釈と引用文献

- 1) 八田明夫, 丹沢哲郎, 土田 理, 田口 哲, 理科教育- 教師とこれから教師になる人のために, 東京教育社, 2004.
- 2) 特定の課題に対する調査(理科), 国立教育政策研究所, 2007.
- 3) 和泉研二, 江口達雄, 化学と教育, 2004, 52, 475.
- 4) 田口 哲, 笠野恵子, 化学と教育, 2001, 49, 158.
- 5) 田口 哲, 目黒英則, 化学と教育, 2005, 53, 626.
- 6) 田口 哲, 松村幸子, 理科の教育, 2003, 51, 31.
- 7) 黒田登志雄, 結晶は生きている- その成長と形の変化のしくみ, サイエンス社, 1984.
- 8) 和泉研二, 化学と教育, 1999, 47, 608.
- 9) 結晶工学ハンドブック, 共立出版, 1971, 128.

- 10) 図3 (C) の挿入写真では結晶が水滴中心部に存在しているが、これは、水滴円周部で結晶核が析出したあと中心部付近に移動した結果である。
- 11) 田口 哲, 佐藤久典, 化学と教育, 投稿中.

(田口 哲 札幌校准教授)

(樋田拓至 札幌校大学院生)